液压式轮胎硫化机结构有限元分析研究

刘全泽，宋瑞华，雷珂，张善泉，朱佳佳，王爽
（青岛海琅智能装备有限公司，山东　青岛　266400）

摘要：液压式轮胎硫化机是橡胶制品生产的核心装备，其结构力学性能直接决定硫化工艺稳定性以及轮胎成品的成型精度。本文基于有限元分析理论构建液压式轮胎硫化机关键承载结构的数值模型，开展静力学与动力学仿真分析，探究额定工况下结构的应力应变分布规律以及模态特性，识别结构力学薄弱区域并提出针对性优化方案。研究结果能为液压式轮胎硫化机的结构设计改进以及可靠性提升提供数据支撑和工程参考。

关键词：液压式轮胎硫化机；有限元分析；结构应力；模态特性；力学优化
引用论文：刘全泽，宋瑞华，雷珂，等．液压式轮胎硫化机结构有限元分析研究 [J]. 橡塑技术与装备，2026, 52(11):45-49.
中图分类号：TQ330.47　　**文章编号**：1009-797X(2026)11-0045-05
文献标识码：B　　DOI:10.13520/j.cnki.rpte.2026.11.009

橡胶工业的快速发展对轮胎硫化装备的结构性能和作业效率提出更高要求，液压式轮胎硫化机（图 1）凭借结构刚度大以及运行稳定性强的特点被广泛应用于子午线轮胎等橡胶制品的生产过程。该设备的主机框架锁模机构以及硫化模腔等核心部件长期在复合载荷工况下运行，易产生应力集中和疲劳损伤等问题，进而影响设备的使用寿命和硫化工艺精度。传统结构设计方法多依赖经验公式和类比设计，难以精准表征复杂工况下的结构力学响应，有限元分析作为现代工程数值仿真的核心手段，能实现复杂结构的精细化力学建模和多工况仿真分析，可有效弥补传统设计方法的不足。本文以液压式轮胎硫化机为研究对象，系统开展结构有限元建模与仿真分析工作，揭示结构力学特性规律并完成结构优化设计，相关研究方法能为橡胶机械领域同类装备的结构分析提供技术参考。



图 1　液压式轮胎硫化机

1　液压式轮胎硫化机结构组成及工作力学特征

液压式轮胎硫化机的核心结构由主机框架锁模机构硫化模腔液压驱动组件以及加热系统构成，各结构单元协同配合完成轮胎硫化过程中的合模保压硫化开模等连续工序。主机框架由上下横梁和立柱组成，是设备的基础承载部件，其结构刚度直接影响整机的运行稳定性，锁模机构通过液压驱动实现模具的闭合与锁紧，工作过程中需承受千吨级锁模力的作用，硫化模腔作为轮胎成型的核心部件，需在高温高压工况下保持型腔精度和密封性能。液压式轮胎硫化机的作业过程伴随静载荷动载荷以及热载荷的共同作用，各核心结构需承受锁模力硫化介质压力和自身重力以及温度应力形成的复合载荷，长期周期性的载荷作用易使结构产生局部应力集中，进而引发塑性变形和疲劳裂纹等结构失效问题，明确设备的结构组成和工作力学特征是开展有限元分析的基础。

2　液压式轮胎硫化机结构有限元建模方法

有限元建模是开展结构力学仿真分析的前提，液压式轮胎硫化机结构有限元建模需遵循几何特征保留与非关键特征简化的基本原则。通过三维建模软件构

作者简介：刘全泽（1992−），男，工程师，本科，主要从事橡胶机械产品设计与研发工作。

建整机关键结构的实体模型，剔除结构中非关键的倒角小孔和工艺槽几何特征，在保证建模精度的同时降低计算复杂度，建模过程中需根据各结构部件的材料属性完成材料参数赋值，主机框架以及锁模机构采用高强度合金结构钢，硫化模腔选用热作模具钢，不同材料的弹性模量泊松比以及屈服强度力学参数均依据材料试验数据确定，核心结构对应材料力学参数如表 1 所示。

表 1　液压式轮胎硫化机核心结构材料力学参数表

结构部件	材料类型	弹性模量 /GPa	泊松比	屈服强度 /MPa
主机框架	高强度合金结构钢	206	0.3	345
锁模机构连杆组件	高强度合金结构钢	209	0.29	420
硫化模腔	热作模具钢	210	0.28	550
液压驱动缸体	合金结构钢	206	0.3	380

将简化后的三维实体模型导入有限元分析软件进行网格划分（图 2），采用六面体结构化单元与四面体非结构化单元相结合的划分方式，对主机框架立柱与横梁的连接部位易产生应力集中的区域进行网格加密，完成网格划分后开展网格质量检查，通过单元翘曲度以及长宽比指标验证模型有效性。网格质量达标后根据设备实际工作工况设定边界条件和载荷施加方式，将主机框架底部与地面的接触部位设置为固定约束，在锁模机构施加载荷以模拟实际工作中的锁模力，在硫化模腔内壁施加均布压力以模拟硫化介质的压力作用，同时考虑结构自身重力和温度应力的影响，最终构建完成适用于多工况仿真分析的液压式轮胎硫化机结构有限元模型。

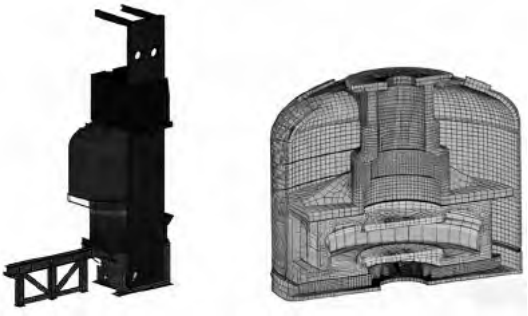


图 2　轮胎硫化机有限元分析

3　液压式轮胎硫化机结构有限元仿真分析

3.1　静力学有限元分析

对构建完成的液压式轮胎硫化机有限元模型开展额定工况下的静力学仿真分析（图 3），求解得到各核心结构的应力云图、应变云图以及位移云图，明确结构的应力应变分布规律。主机框架的立柱与上下横梁的连接部位出现明显的应力集中现象，该区域的等效应力值接近材料的屈服强度，是整机结构的力学薄弱区域，锁模机构的连杆组件应力分布较为均匀，应变值处于材料的弹性变形范围内，硫化模腔的整体等效应力较小，位移幅值满足轮胎硫化的型腔精度要求，液压驱动组件的缸体与活塞杆连接部位应力值适中，无明显应力集中现象。静力学分析结果表明整机结构的整体力学性能良好，但主机框架的局部应力集中问题需进行针对性优化，否则长期载荷作用下易产生结构失效。



图 3　轮胎硫化机有限元分析

3.2　动力学有限元分析

动力学有限元分析的核心是探究结构的模态特性，避免设备工作过程中发生共振现象。对液压式轮胎硫化机有限元模型开展无约束模态分析，求解得到结构前六阶固有频率以及对应振型，结构前六阶模态特性参数如表 2 所示。

表 2　液压式轮胎硫化机结构前六阶模态特性参数表

模态阶数	固有频率 /Hz	振型特征
一阶	12.6	主机框架整体弯曲变形
二阶	18.3	锁模机构横向摆动
三阶	27.5	上横梁局部扭转振动
四阶	35.8	立柱对称弯曲振动
五阶	42.1	硫化模腔周向振动
六阶	51.4	整机局部耦合振动

各阶固有频率均远离设备工作过程中液压驱动以及电机运转产生的激励频率，说明整机结构的共振风险较低，动力学稳定性良好，硫化模腔在高阶振型下

出现局部振动幅值偏大的问题，虽未引发整机共振，但会影响轮胎硫化的成型精度，需对模腔的连接方式进行优化设计，提升其抗振性能，如图 4 所示。

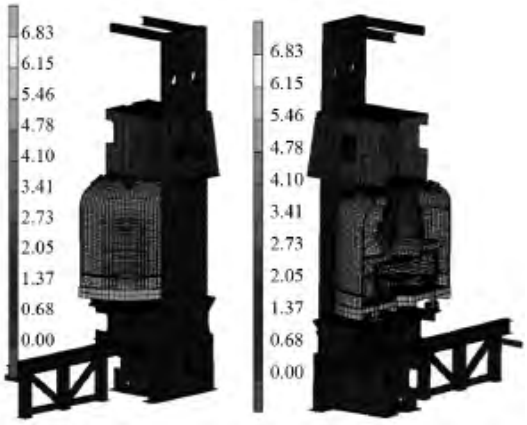


图 4　轮胎硫化机有限元分析

4　液压式轮胎硫化机结构力学优化设计

基于液压式轮胎硫化机结构有限元仿真分析结果，针对识别出的力学薄弱区域和性能优化要点，开展结构针对性优化设计工作。对于主机框架连接部位的应力集中问题，采用增加连接部位圆角过渡尺寸并增设加强筋的方式实现结构强化，通过优化结构几何形状分散局部应力，提升该区域的抗疲劳性能，对于硫化模腔局部振动幅值偏大的问题，在模腔与主机框架的连接部位增设减振垫片并优化连接螺栓的布置方式，提升模腔的结构刚度和抗振性能，同时对锁模机构的连杆组件进行材料性能优化，选用更高强度的合金材料提升其承载能力。对优化后的液压式轮胎硫化机结构重新开展有限元仿真分析，结果表明优化后主机框架应力集中区域的等效应力显著降低，硫化模腔的局部振动幅值大幅减小，整机结构的应力应变分布更趋均匀，结构刚度和动力学稳定性均得到有效提升，优化后的结构能更好地适应复合载荷工况的工作要求，可有效延长设备的使用寿命。

4.1　结构几何优化设计

结构几何优化设计以消除应力集中提升结构固有刚度为核心目标，针对主机框架与硫化模腔的力学薄弱特征开展构型改进与参数优化，遵循等强度设计与静动力学耦合设计的原则，让结构几何形态更适配实际受力特征，能从根源上改善结构的应力分布状态并提升抗振性能。主机框架立柱与上下横梁的连接部位是应力集中的核心区域，该区域的几何突变是引发应力集中的主要原因，通过增大连接部位的圆角过渡半径消除几何突变带来的应力集中效应，同时在连接部位对称布置加强筋板，依据载荷传递方向确定加强筋板的厚度与布置角度，采用参数化建模的方式完成加强筋板尺寸参数的迭代分析，确定最优的结构参数组合，能有效分散局部载荷并传递应力，提升该区域的结构刚度与抗疲劳性能。硫化模腔局部振动幅值偏大的核心原因是自身结构刚度不足且型腔壁厚分布不合理，对模腔采用变壁厚设计思路，在易产生振动的型腔边缘区域增加壁厚以提升局部刚度，在非承载的型腔内侧区域适当减薄壁厚实现轻量化设计，在保证结构力学性能的前提下降低振动惯性载荷的影响，同时对模腔的外缘轮廓进行修型优化，减少轮廓突变引发的振动共振现象。几何优化过程中通过有限元仿真对各优化参数进行实时校核，避免单一维度的几何改进引发其他结构部位的力学性能衰减，让整机结构的几何构型形成载荷均匀传递的力学体系，提升结构整体的静力学与动力学性能。

4.2　材料及连接方式优化设计

材料及连接方式优化设计以提升结构承载能力与阻隔振动传递为核心目标，针对锁模机构的交变载荷承受特征以及硫化模腔的振动传递问题，开展材料性能升级与连接结构改进，实现材料性能与连接刚度的精准匹配，能进一步增强整机结构的力学性能与作业稳定性。锁模机构的连杆组件长期承受千吨级交变锁模力的作用，原有材料的屈服强度与疲劳极限难以适配长期交变载荷的作业要求，易产生疲劳变形与损伤，选用高强度合金结构钢替代原有材料，同时优化材料的热处理工艺，提升材料的屈服强度与疲劳极限，保证材料刚度与韧性的协同匹配，避免因材料脆断引发的结构失效，能有效增强连杆组件的承载能力与抗疲劳性能，让锁模机构更适配周期性合模开模的作业工况。硫化模腔与主机框架的传统刚性螺栓连接易形成振动传递路径，导致模腔局部振动幅值偏大，在连接部位增设高弹性模量的减振垫片，采用弹性连接的方式阻隔主机框架与模腔之间的振动传递，同时优化连接螺栓的布置方式，采用圆周均布的原则增加螺栓数量并提高螺栓预紧力，提升模腔与主机框架的连接刚度，减少连接部位的间隙振动，能有效降低模腔的局部振动幅值。液压驱动组件与锁模机构的铰链连接部位易因间隙产生附加载荷，通过更换自润滑耐磨的衬

套材料提升连接部位的转动精度与承载稳定性，减少因连接间隙引发的附加载荷与振动激励，让各结构部件的连接部位形成稳定的载荷传递与运动约束体系。材料优化过程中结合各结构部件的服役工况与力学要求确定材料类型，避免过度材料升级造成的成本增加，连接方式优化兼顾连接刚度与抗振性能的协同提升，让材料性能与连接结构形成相互支撑的力学优化体系。

对经过结构几何优化以及材料与连接方式优化后的液压式轮胎硫化机整机结构重新构建有限元模型，按照额定作业工况施加边界条件与载荷，开展静力学以及动力学的仿真校核分析，优化前后整机核心力学性能参数对比如表 3 所示。

表 3　液压式轮胎硫化机优化前后核心力学性能参数对比表

性能指标	优化前数值	优化后数值
主机框架最大等效应力 /MPa	328	186
硫化模腔最大位移 /mm	0.12	0.05
结构一阶固有频率 /Hz	12.6	15.8
锁模机构连杆最大应力 /MPa	285	212
硫化模腔五阶振动幅值 /mm	0.08	0.03

优化后主机框架应力集中区域的等效应力较优化前显著降低，其数值远低于材料的屈服强度，应力应变分布更趋均匀，硫化模腔的局部振动幅值大幅减小，各阶固有频率进一步远离设备作业过程中的激励频率，共振风险进一步降低，锁模机构连杆组件的承载能力显著提升，在额定锁模力作用下无明显的塑性变形趋势。优化后的整机结构刚度与动力学稳定性均得到有效提升，能更好地适应锁模力硫化介质压力以及温度应力形成的复合载荷工况，可有效降低结构应力集中疲劳损伤以及振动失效的发生概率，延长设备的实际使用寿命，同时整机的合模精度与硫化型腔精度得到进一步提升，型腔表面的位移幅值控制在更高精度的工艺范围内，能更好地匹配高等级子午线轮胎的硫化生产要求，为轮胎成品的成型精度提供坚实的设备结构保障。

5　结语

本文以液压式轮胎硫化机为研究对象，基于有限元分析理论系统开展了整机关键承载结构的建模静力学以及动力学仿真分析，同时完成了结构力学薄弱区域的识别与针对性优化设计工作。通过构建精细化的有限元模型，精准揭示了额定工况下液压式轮胎硫化机的应力应变分布规律以及模态特性，明确了主机框架连接部位的应力集中以及硫化模腔局部振动幅值偏大的核心力学问题，制定的几何结构优化与材料性能优化以及连接方式优化相结合的组合式优化方案，经仿真校核验证具备良好的可行性与有效性。优化后的液压式轮胎硫化机结构应力应变分布更趋均匀，结构刚度以及动力学稳定性均得到显著提升，能有效降低结构失效风险并延长设备使用寿命。有限元分析技术能实现液压式轮胎硫化机复杂工况下的精细化力学分析，为设备的结构设计改进提供了精准的数值数据支撑，本文采用的研究方法与得到的分析结果，能为橡胶机械领域同类装备的结构有限元分析以及可靠性设计提供工程参考。后续可结合设备的实际运行工况，开展结构的疲劳寿命分析以及多工况载荷耦合仿真分析，进一步完善液压式轮胎硫化机的结构设计体系，同时可引入多目标优化算法实现设备结构的轻量化与力学性能的协同优化，推动液压式轮胎硫化机的设计制造向高效化与精细化方向发展。

Finite element analysis study on the structure of hydraulic tire curing press

Liu Quanze, Song Ruihua, Lei Ke, Zhang Shanquan, Zhu Jiajia, Wang Shuang

(Qingdao Hailang Intelligent Equipment Co. LTD., Qingdao 266400, Shandong, China)

Abstract: The hydraulic tire curing press is the core equipment in rubber product production, and its structural mechanical properties directly determine the stability of the curing process and the molding accuracy of the finished tire. Based on finite element analysis theory, this paper constructs a numerical model of the key load-bearing structure of the hydraulic tire curing press, conducts static and dynamic simulation analysis, explores the stress-strain distribution law and modal characteristics of the structure under rated

conditions, identifies weak areas in structural mechanics, and proposes targeted optimization schemes. The research results can provide data support and engineering reference for the structural design improvement and reliability enhancement of the hydraulic tire curing press.

Key words: hydraulic tire curing press; finite element analysis; structural stress; modal characteristics; mechanical optimization

(R-03)

朗盛发布全新阻燃剂平台，首款产品 Purventis Core 面向聚氨酯 /PIR 保温泡沫

Lanxess has launched a new flame retardant platform, with its first product, Purventis Core, targeting polyurethane/PIR insulation foam

2026 年 9 月 22 日，特种化学品公司朗盛（LANXESS）推出了一个面向保温材料解决方案的全新阻燃剂平台 Purventis。该平台旗下的首款商业化产品是 Purventis Core，这是一种用于硬质聚氨酯（PU）和聚异氰脲酸酯（PIR）保温泡沫的反应型无卤磷系阻燃剂。Purventis Core 旨在满足多元醇配方设计师、聚氨酯系统供应商以及保温板或喷涂泡沫生产商日益增长的需求，即在 PU/PIR 保温系统中兼顾防火性能、低排放、加工实用性和长期法规适应性。

硬质聚氨酯（PU）和聚异氰脲酸酯（PIR）泡沫广泛应用于节能建筑保温领域，包括建筑板材、屋顶与墙体保温以及闭孔喷涂泡沫。随着全球法规框架的不断演变，保温材料生产商正积极寻求既能满足未来合规要求又能符合产品技术规格的阻燃技术。在此背景下，对于 PU/PIR 行业而言，除了磷酸三 (1－氯－2－丙基) 酯（TCPP）和磷酸三乙酯（TEP）等传统添加型阻燃剂外，这种新型解决方案是一种极具吸引力的选择。

以反应型化学技术应对不断变化的保温材料需求

Purventis Core 基于朗盛此前以 Levagard® 2100 品牌销售的技术开发而成，是一款低黏度、无卤、无芳香族成分且不含 TPP（磷酸三苯酯）和苯酚的反应型磷系阻燃剂。与其他添加型阻燃剂不同，它能通过化学键合的方式融入聚氨酯基体中。这种方式旨在帮助生产商在应对配方调整、重新认证及规格变更的同时，保持硬质 PU/PIR 保温材料所需的各项性能指标。

朗盛聚合物添加剂业务部应用开发负责人 Heiko Tebbe 表示："通过 Purventis，我们为保温材料市场打造了一个定位更清晰的平台。Purventis 建立在客户所熟知的技术之上，并针对 PU 和 PIR 保温材料领域日益重要的议题提供了解决方案，这些议题包括法规适应性、低排放、合规文档支持以及可靠的泡沫性能。"

测试数据证实了其低排放特性及更低的添加量需求

测试结果显示，Purventis Core 不会增加总挥发性有机化合物（VOC）的排放量，这证明该产品已成功结合到聚合物基体中。与 TCPP 和 TEP 相比，该技术还展现出更高的阻燃效率。这对生产商而言至关重要，因为阻燃剂的添加量会影响配方设计、成本核算、加工工艺以及最终泡沫制品的特性。朗盛的测试数据还表明，Purventis Core 有助于提升泡沫的力学性能，使泡沫保持比使用传统阻燃剂时更高的刚性。

通过依托其 Purventis 平台成熟的技术优势，朗盛正进一步优化产品方案，助力保温材料生产商调整其聚氨酯（PU）/ 聚异氰脲酸酯（PIR）产品组合，以应对不断变化的法规与市场需求。

摘编自"PUWORLD"

(R-03)